



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria  
de Manresa



# Treball Final de Grau

## Millora Aerodinàmica d'un Automòbil Esportiu

Autor: Alfredo Grasso Sánchez

Tutor: Jordi Vives Costa

Juny de 2019

Centre: Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

## **Agraïments**

Primer de tot, agrair al meu tutor durant aquest projecte, Jordi Vives, que ha acceptat dirigir aquest treball, que m'ha aportat idees per poder triar el tema del projecte ja que al començament no ho tenia molt clar i que també m'ha guiat i aconsellat durant el llarg del treball.

També m'agradaria donar les gràcies a la meva família, amics, companys de classe i als professors de la universitat, que m'han estat ajudant en aquesta etapa de 4 anys.

Durant aquest temps m'ho he passat molt bé, he conegut a molta gent i he pogut aprendre moltes coses que seran molt útils en el món laboral i a la vida.

## **Resum**

Aquest projecte es basa en l'estudi aerodinàmic aplicat als vehicles, mitjançant la implantació de varis elements aerodinàmics, s'ha volgut veure, d'una manera més numèrica, com l'aire afecta als cotxes.

El vehicle triat per fer l'estudi és un Audi TT del 2008, un cotxe esportiu que va bé per aplicar-li les millores i fer les simulacions degut a la seva geometria simple comparada amb altres cotxes esportius.

El treball està dividit principalment en tres parts, introducció als conceptes bàsics de l'aerodinàmica, disseny de les millores a aplicar al cotxe de sèrie i simulació amb CFD dels diferents models.

A la primera part s'ha volgut explicar els conceptes bàsics de l'aerodinàmica per poder comprendre com es comporta el flux de l'aire al voltant del cotxe i quin efecte provoca en el cotxe.

A la segona part, a partir d'un model del cotxe de sèrie s'han dissenyat amb Solidworks un aleró i un difusor de manera que gràcies a aquests elements aerodinàmics es pugues aconseguir sustentació negativa.

A la tercera part s'ha fet la simulació mitjançant CFD dels diferents models amb un mòdul de simulació de fluids de Solidworks; gràcies als càlculs que ha fet el programa s'han pogut veure els resultats.

Finalment, comparant els resultats obtinguts s'ha pogut comprovar la utilitat de les millores i veure com els conceptes bàsics de l'aerodinàmica que s'havien estudiat es complien.

## **Abstract**

This project is based on the aerodynamic study applied to vehicles, through the implantation of several aerodynamic elements, it was intended to show, in a more numeric way, how the air affects cars.

The vehicle chosen to do the study is an Audi TT from 2008, a sports car that perfectly suits to apply the improvements and make the simulations due to its simple geometry compared to other sports cars.

The project is divided mainly in three parts, introduction to the basic concepts of aerodynamics, design of the improvements to apply to the serial car and simulation with CFD of the different models.

In the first part the intention was to explain the basic concepts of aerodynamics to be able to understand how the air flow behaves around the car and what effect it causes to the car.

In the second part, from a model of the serial car, a spoiler and a diffuser have been designed with Solidworks to let these aerodynamic elements achieve a negative support (downforce).

In the third part, the CFD simulation of the different models was carried out with a Solidworks fluid simulation module and thanks to the calculations that the program has done, it has been possible to see the results.

Finally, comparing the results obtained, the utility of the improvements could be seen and confirmed, as well as how the basic concepts of the aerodynamics that had been studied were fulfilled.

# Índex general

<b>1.Introducció.....</b>	<b>8</b>
<b>2.Aerodinàmica.....</b>	<b>9</b>
2.1.Principi de Bernoulli.....	9
2.2.Número de Reynolds.....	11
2.3.Capa límit.....	12
2.4.Forces aerodinàmiques.....	14
2.5.Elements aerodinàmics a estudiar.....	18
<b>3.Simulació del cotxe de sèrie amb CFD.....</b>	<b>20</b>
3.1.Model del cotxe escollit.....	20
3.2.Introducció CFD.....	21
3.3.Simulació del model de sèrie.....	21
<b>4.Millores aerodinàmiques.....</b>	<b>26</b>
4.1.Millora aleró.....	26
4.2.Millora difusor.....	27
4.3.Cotxe amb les dos millores.....	28
<b>5.Simulació del cotxe modificat amb CFD.....</b>	<b>29</b>
5.1.Simulació del model amb aleró.....	29
5.2.Simulació del model amb difusor.....	30
5.3.Simulació del model amb les dos millores.....	31
<b>6.Anàlisi de resultats.....</b>	<b>33</b>
<b>7.Planificació del projecte.....</b>	<b>35</b>
<b>8.Conclusions.....</b>	<b>36</b>
<b>9.Bibliografia.....</b>	<b>37</b>

# Índex de figures

Figura 1: Esquema on es compleix el principi de Bernoulli.....	10
Figura 2: Diferències de pressió i velocitat en un perfil alar.....	11
Figura 3: Flux laminar.....	12
Figura 4: Flux turbulent.....	12
Figura 5: Efecte dels generadors de vòrtex en la capa límit al llarg d'una superfície.....	13
Figura 6: Comparació entre una pilota sense forats i amb forats.....	13
Figura 7: Forces aerodinàmiques en un perfil alar normal i en un invertit.....	14
Figura 8: Coeficient de resistència a l'avanç de cossos bidimensionals.....	15
Figura 9: Evolució històrica dels coeficients de resistència dels automòbils.....	16
Figura 10: Representació de la força de sustentació positiva.....	17
Figura 11: Representació de la força de sustentació negativa.....	17
Figura 12: Aleró d'un cotxe.....	18
Figura 13: Difusor d'un cotxe.....	18
Figura 14: Efecte de l'angle de sortida dels baixos del cotxe.....	19
Figura 15: Vista frontal del cotxe.....	20
Figura 16: Vista lateral del cotxe.....	20
Figura 17: Geometria a simular, conjunt de cotxe i terra.....	21
Figura 18: Configuració del tipus de simulació.....	22
Figura 19: Paràmetres de la simulació.....	22
Figura 20: Volum de control i les seves dimensions.....	23
Figura 21: Mallat del model.....	23
Figura 22: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe de sèrie a 50 m/s.....	24
Figura 23: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 50 m/s.....	24
Figura 24: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe de sèrie a 50 m/s.....	24
Figura 25: Model de la millora de l'aleró.....	26
Figura 26: Vista lateral del cotxe amb aleró.....	26
Figura 27: Vistes posterior i en perspectiva del cotxe amb aleró.....	26

Figura 28: Vista en detall del difusor a la part posterior del cotxe.....	27
Figura 29: Vista lateral del cotxe amb difusor.....	27
Figura 30: Vista posterior del cotxe amb difusor.....	27
Figura 31: Vista lateral del cotxe amb difusor.....	28
Figura 32: Vistes posterior i en perspectiva del cotxe amb les dos millores.....	28
Figura 33: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe amb aleró a 50 m/s.....	29
Figura 34: Pressió al voltant del cotxe amb aleró a 50 m/s.....	29
Figura 35: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe amb aleró a 50 m/s.....	29
Figura 36: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe amb difusor a 50 m/s.....	30
Figura 37: Pressió al voltant del cotxe amb difusor a 50 m/s.....	30
Figura 38: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe amb difusor a 50 m/s.....	31
Figura 39: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe amb les dos millores a 50 m/s.....	31
Figura 40: Pressió al voltant del cotxe amb les dos millores a 50 m/s.....	32
Figura 41: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe amb les dos millores a 50 m/s.....	32

## **Índex de taules**

Taula 1: Característiques de l'Audi TT 2008 escollit.....	20
Taula2: Força de sustentació generada al cotxe de sèrie.....	25
Taula 3: Força de sustentació generada al cotxe amb aleró.....	30
Taula 4: Força de sustentació generada al cotxe amb difusor.....	31
Taula 5: Força de sustentació generada al cotxe amb les dos millores.....	32
Taula 6: Comparativa del les forces de sustentació obtingudes als diferents models.....	33
Taula 7: Hores de dedicació a les tasques del projecte.....	35

# **1.Introducció**

L'objectiu principal d'aquest projecte és analitzar l'aerodinàmica d'un Audi TT (2008) mitjançant CFD i aconseguir millorar el rendiment aerodinàmic del cotxe augmentant la sustentació negativa (Downforce). Per fer-ho primer s'estudiarà com l'aerodinàmica afecta als cotxes, llavors, a partir d'un model del cotxe, es faran algunes modificacions i es simularan els models sense i amb millores per finalment comparar resultats i poder veure si les millores funcionen.

Com a objectius alternatius també estan recordar els coneixements bàsics que havia fet al grau anteriorment, fer uns bons dissenys de les millores recordant les operacions de Solidworks i aprendre a fer simulacions amb CFD, que no havia fet mai abans.

He triat aquest treball ja que sempre m'han agradat les carreres de cotxes i volia investigar més sobre com afecta l'aerodinàmica en els cotxes ja que sempre havia escoltat que es guanyaven moltes carreres per tenir una millor aerodinàmica i per poder fer les corbes més ràpid.

El projecte constarà de les següents parts:

- Conceptes bàsics de l'aerodinàmica i la seva relació amb els cotxes.
- Disseny dels elements aerodinàmics que milloraran al cotxe.
- Simulació aerodinàmica amb CFD dels diferents models del cotxe.
- Anàlisi de resultats.



## 2.Aerodinàmica

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia les accions que apareixen sobre els cossos sòlids quan existeix un moviment relatiu entre aquests i l'aire [2].

Degut a la complexitat dels fenòmens que tenen lloc i de les equacions que els descriuen, es fan models aproximats dels cossos (amb les equacions de continuïtat, quantitat de moviment i energia) i es fan assajos pràctics (per exemple, assajos en el túnel de vent) com els assajos numèrics i les simulacions per ordinador (CFD).

S'ha de tenir en compte que el problema aerodinàmic no inclou deformacions del cos, no es deforma ni de manera elàstica ni plàstica.

Aquesta ciència s'ha utilitzat principalment per a facilitar el vol dels avions i reduir el consum dels automòbils (augmentant el seu rendiment, reduint la seva resistència a l'aire).

Per tal d'entendre com l'aire afecta als cotxes cal veure alguns principis bàsics relacionats amb el comportament de l'aire.

### 2.1.Principi de Bernoulli

El principi de Bernoulli, també conegut com a equació de Bernoulli o teorema de Bernoulli, descriu el comportament d'un fluid qualsevol que es mou a través d'una línia de corrent. Aquest principi va ser publicat per Daniel Bernoulli a la seva obra *Hidrodinàmica* i explica que un fluid ideal (no viscos i sense fricció) que es mou a través d'un conducte tancat posseeix una energia constant i permanent al llarg del seu recorregut [3].

L'energia d'un fluid consta de tres components:

- **Energia cinètica:** És l'energia deguda a la velocitat que posseeix el fluid.
- **Energia potencial o gravitacional:** És l'energia deguda a l'altitud en la que es troba el fluid.
- **Energia en forma de pressió:** És l'energia que conté un fluid degut a la seva pressió.

Per poder aplicar el principi de Bernoulli s'han de suposar les següents condicions:

- La viscositat del fluid no es té en consideració.
- El cabal es constant.
- El fluid a estudiar és incompressible on,  $\rho = \text{constant}$ .
- L'equació s'aplica al llarg d'una línia de corrent o un flux laminar o turbulent.

L'equació de Bernoulli és la següent:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{ct.}$$

$V$  = velocitat del fluid en la secció considerada.

$g$  = acceleració de la gravetat.

$z$  = altura geomètrica.

$P$  = pressió.

$\rho$  = densitat del fluid.

En un tub amb dos seccions diferents es pot considerar que [4]:

$$Q_1 = Q_2 = V_1 A_1 = V_2 A_2$$

$$\frac{V_1^2 \rho}{2} + P_1 + \rho g z_1 = \frac{V_2^2 \rho}{2} + P_2 + \rho g z_2$$

$V^2 \rho / 2$  = energia cinètica per unitat de volum.

$\rho g z$  = energia potencial per unitat de volum.

$P$  = energia en forma de pressió.

Amb això es pot veure que la velocitat en la secció 1 és més gran que a la secció 2 ja que l'àrea en la secció 1 és menor que la 2. La pressió en la secció 1 és menor que la pressió en la secció 2.

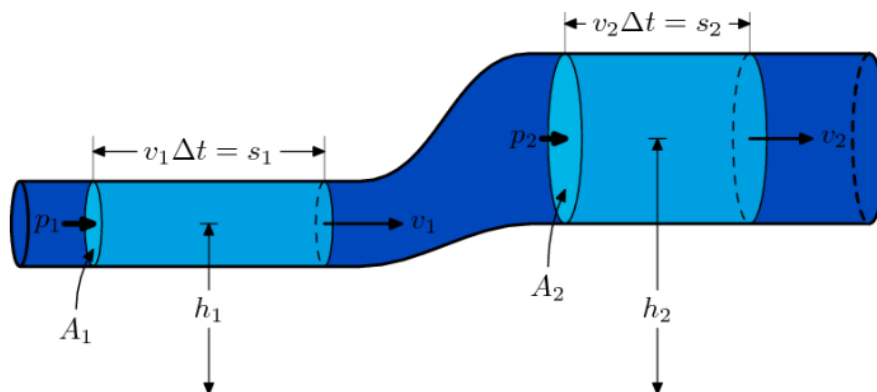


Figura 1: Esquema on es compleix el principi de Bernoulli [4].

La principal aplicació del principi de Bernoulli en l'aerodinàmica dels avions i en la dels automòbils està en la força de sustentació que dona l'aire degut a la diferència de velocitats i pressions que hi ha entre la part superior i inferior del perfil aerodinàmic.

Per tal d'explicar la funció d'aquest fenomen en l'aerodinàmica i la sustentacions dels avions s'utilitzarà el següent perfil alar (Figura 2).

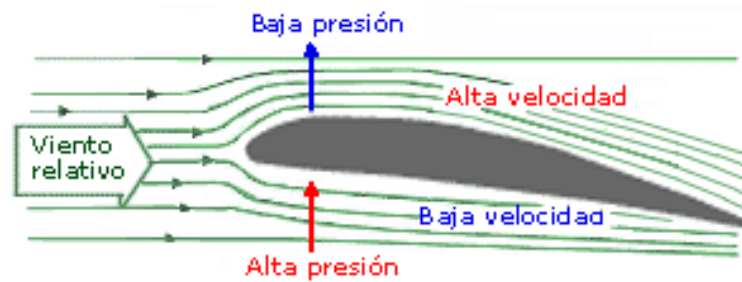


Figura 2: Diferències de pressió i velocitat en un perfil alar [13].

L'ala produeix un flux d'aire en proporció a l'angle d'atac i a la velocitat amb la que l'ala es mou respecte a la massa d'aire que la envolta; l'aire que passa per la part superior del perfil tindrà una velocitat major (efecte Venturi) que el que passa per la part inferior. Aquesta major velocitat implica menor pressió.

Llavors, la superfície superior de l'ala suporta menys pressió que la superfície inferior. Aquesta diferencia de pressions produeix una força aerodinàmica que empenya l'ala de la zona de major pressió (inferior) a la zona de menor pressió (superior), conforme a la Tercera Llei del Moviment de Newton.

Però a més, la corrent d'aire que flueix a major velocitat per sobre de l'ala, al trobar-se amb la que flueix per sota mou a aquesta última cap a sota, produint una força de reacció addicional cap amunt. La suma d'aquestes dos forces es el que es coneix per força de sustentació, que es la que manté l'avió a l'aire.

En el cas dels cotxes es fa servir aquest efecte però en sentit contrari, es vol generar una força cap avall que genera una gran càrrega aerodinàmica que permet millorar el (rendiment aerodinàmic) pas per corba, la tracció (al haver més contacte del neumàtic amb el terra) i l'estabilitat.

## **2.2.Número de Reynolds**

El número de Reynolds (Re) és un nombre adimensional utilitzat en mecànica de fluids per a caracteritzar el moviment d'un fluid. Va ser descrit per Osborne Reynolds a l'any 1883 [5].

Es defineix com:

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu}$$

$\rho$  = Densitat del fluid

$D$  = Diàmetre de la canonada

$v$  = Velocitat del fluid

$\mu$  = Viscositat dinàmica del fluid

El seu valor indica si el flux segueix un model laminar o turbulent, si el número de Reynolds és menor de 2100 el flux serà laminar i si es major de 4000 el flux serà turbulent.

En un **flux laminar** el fluid està totalment ordenat, es mou en làmines paral·leles sense que es barregin entre elles.



Figura 3: Flux laminar [16].

En un **flux turbulent** les partícules del fluid es mouen de forma desordenada i les seves trajectòries es troben formant petits remolins.

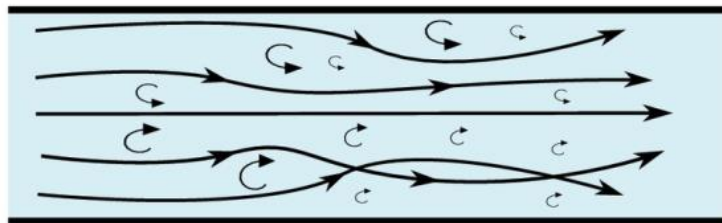


Figura 4: Flux turbulent [16].

### 2.3.Capa límit

És la zona on el moviment del fluid es pertorbat per la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. Aquest concepte va ser proposat per Ludwig Prandtl l'any 1904, gràcies a ell es va poder desenvolupar la enginyeria aeronàutica tal i com la coneixem avui dia [6].

La presència d'aquesta capa es deu principalment a l'existència de la viscositat, (fins ara s'havia considerat l'aire com a un gas ideal, sense fricció) propietat inherent de qualsevol fluid. La viscositat fa que aparegui la força de fricció i que es produeixi una variació en el moviment de les línies de corrent més properes a ella.

La capa límit pot ser laminar o turbulenta, si les diferències de velocitats degudes a la fricció són petites, les línies de flux es mouran paral·lelament i es formarà una capa límit laminar, si en canvi hi ha qualsevol obstacle a la superfície que altera la direcció i velocitat de les línies de flux, es formarà una capa límit turbulenta.

La capa límit laminar té menys resistència aerodinàmica (resistència a l'avanç) que la capa límit turbulenta ja que no té tanta fricció. Tot i que sembli que és millor tenir una

capa límit laminar, aquesta es desprèn del sòlid abans que la turbulenta ja que té menys adherència a la superfície sòlid. Això es molt negatiu ja que quan es desprèn la capa límit deixa d'haver càrrega aerodinàmica de forma sobtada, en el cas dels cotxes pot fer que no s'aprofitin els elements aerodinàmics que tenen i en els avions els pot fer entrar en pèrdua.

L'opció utilitzada per retardar al màxim el despreniment és el de partir d'una capa límit laminar que es transformi en turbulenta gràcies a els generadors de vòrtex que són els obstacles que donen turbulència a la capa límit laminar.

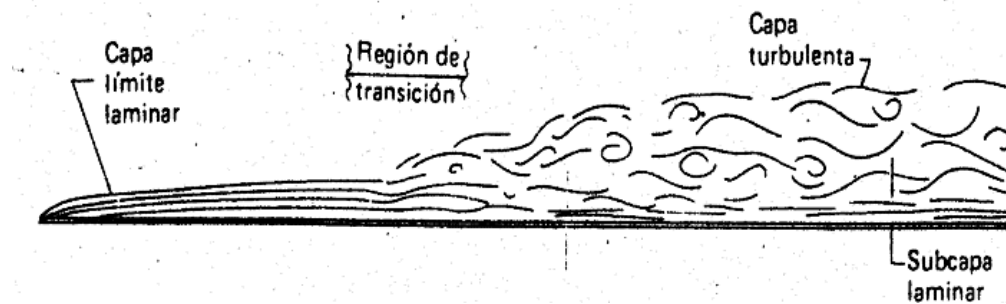


Figura 5: Efecte dels generadors de vòrtex en la capa límit al llarg d'una superfície [17].

En el cas de les pilotes de golf, els generadors de vòrtex són forats que creen turbulències i que fan que l'aire envolti la pilota al tenir més adherència (la capa límit es desprèn més tard) [7].

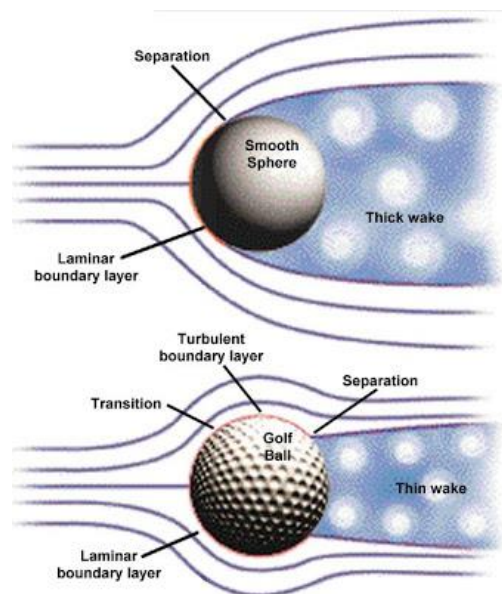


Figura 6: Comparació entre una pilota sense forats i amb forats [7].

Tot i que en principi com s'ha vist, la capa límit laminar té més resistència a l'avanç, al retardar-se el despreniment de la capa límit es redueix la resistència a l'avanç ja que l'aire haurà de desviar-se menys per envoltar el sòlid.

## 2.4. Forces aerodinàmiques

Quan es realitza un estudi aerodinàmic es necessari calcular les forces i els moments que actuen sobre el sòlid que està en contacte amb el fluid. La relació entre forces sobre un cos interactuant amb el fluid i les velocitats ve donada pels coeficients aerodinàmics. Els mes senzills son els primers, que donen la força de sustentació **L**, la resistència aerodinàmica **D** y força lateral **Y** en termes del quadrat de la velocitat ( $V^2$ ), la densitat del fluid ( $\rho$ ) i l'àrea transversal ( $S_t$ ) [2]:

### **Coeficient de sustentació**

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 S_t}$$

### **Coeficient de resistència**

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 S_t}$$

### **Coeficient de força lateral**

$$C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho V^2 S_t}$$

Quan un perfil aerodinàmic es mou respecte a l'aire, genera una força aerodinàmica, en direcció contrària al moviment amb un angle respecte l'horitzontal. Aquesta força aerodinàmica (resultant) es pot descompondre en dos components:

**-Resistència aerodinàmica:** és el component de la força paral·lela a la direcció del moviment relatiu.

**-Força de sustentació:** és la component de la força perpendicular a la direcció del moviment relatiu.

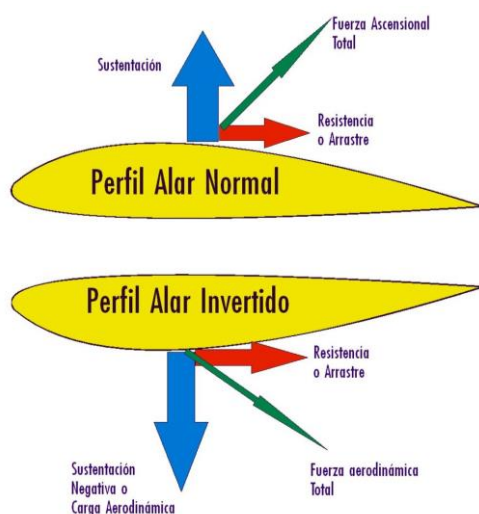


Figura 7: Forces aerodinàmiques en un perfil alar normal i en un invertit [18].

Las formes característiques de la majoria dels automòbils, juntament amb lo propers que van del terra, produeixen una gran interacció entre la geometria i el flux. Petites variacions en la forma poden tenir una gran influència en las forces aerodinàmiques.

### Resistència aerodinàmica (Drag)

És la força que pateix un cos al moure's a través del aire, en sentit oposat al del moviment, pel que habitualment es diu de ella que es la força que s'oposa a l'avanç de un cos a través del aire [8].

L'equació de la resistència aerodinàmica és:

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_t C_D$$

**D** és la resistència aerodinàmica en newtons.

**$\rho$**  és la densitat del fluid, en kg/m<sup>3</sup>.

**V** és la velocitat, en m/s.

**$S_t$**  és l'àrea frontal projectada del cos, en m<sup>2</sup>.

**$C_D$**  és el coeficient de resistència. Com la resta de coeficients aerodinàmics, es adimensional.

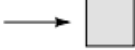
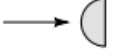


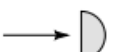
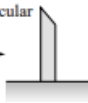
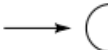
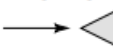
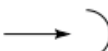
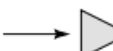

Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal
Cilindro cuadrado:		Medio cilindro:		Placa:	
	2,1		1,2		2,0
	1,6		1,7	Placa plana perpendicular a pared:	
Medio tubo:		Triángulo equilátero:			1,4
	1,2		1,6		
	2,3		2,0	Hexágono:	
					1,0
					0,7

Figura 8: Coeficient de resistència a l'avanç de cossos bidimensionals [1].

El disseny més aerodinàmic dels automòbils ha provocat una gran reducció de la resistència d'aquests en els últims anys. Els cotxes actuals tenen un coeficient de resistència mig, basat en l'àrea frontal, de 0,3. El mínim pràctic que s'ha pogut aconseguir és de 0,15, el cas d'un vehicle amb la forma d'una gota [1].

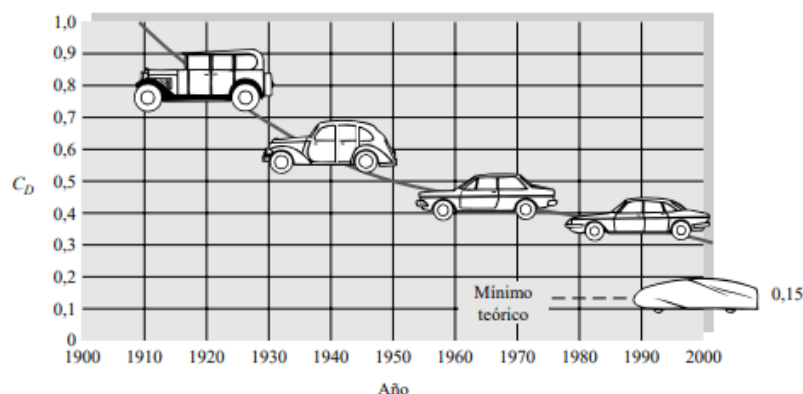


Figura 9: Evolució històrica dels coeficients de resistència dels automòbils [1].

### **Força de sustentació**

La sustentació és la força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid, en direcció perpendicular al moviment. L'aplicació més coneguda és la de l'ala d'un avió, la superfície és la d'un perfil alar [9].

L'equació de la força de sustentació és:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_t C_L$$

**L** és la força de sustentació en newtons.

**$\rho$**  és la densitat del fluid, en kg/m<sup>3</sup>.

**V** és la velocitat, en m/s.

**$S_t$**  és l'àrea de referència del cos (superfície alar), representada en m<sup>2</sup>.

**$C_L$**  és el coeficient de sustentació. Com la resta de coeficients aerodinàmics, és adimensional.

Hi ha dos tipus de sustentació, quan la força és vertical positiva (lift) i quan la força és vertical negativa (downforce).

#### **-Positiva (lift)**

Aquest tipus de força és la que es busca en els avions per poder vèncer el pes propi i enlairar-se.



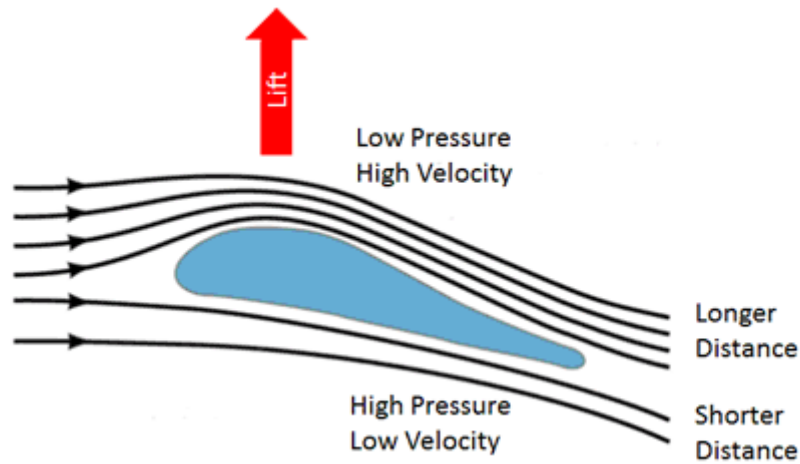


Figura 10: Representació de la força de sustentació positiva [19].

#### -Negativa (downforce)

Molts automòbils de sèrie no tenen gairebé sustentació negativa o fins i tot tenen una mica de positiva. Aquest tipus de força és la que es busca en els automòbils de manera que el vehicle sigui empentat cap a terra, per tal d'obtenir una millor adherència o recolzament aerodinàmic que augmenti la velocitat a les corbes, mitjançant superfícies com alerons, difusors o l'aprofitament del fons pla.

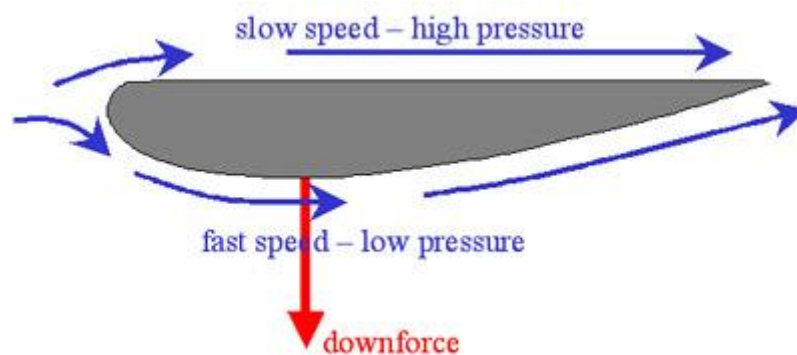


Figura 11: Representació de la força de sustentació negativa [20].

## **2.5.Elements aerodinàmics a estudiar**

### **Aleró**

En cotxes de competició, l'aleró equival a l'ala d'un avió però al revés. L'aleró està dissenyat amb una cara recta i una cara corba, o amb les dues cares corbes però amb una d'elles de major longitud, la cara amb major longitud o recorregut és la que està a la part inferior.

Tal i com s'ha vist amb el principi de Bernoulli, això produeix que l'aire que passa per la part inferior de l'aleró adapti una velocitat superior al de l'aire que passa per la part de sobre generant una forta caiguda de pressió (depressió) en la cara corba (cara inferior) i que aparegui una força de sustentació negativa que succiona el vehicle cap a terra.

D'aquesta manera s'augmenta la fricció entre els neumàtics i l'asfalt i en conseqüència, augmenta l'adherència i la tracció del cotxe i en definitiva millora el temps en fer una volta. En cotxes de producció en sèrie, es considera a Nissan com l'inventor d'aquesta peça, quan en 1969 va crear una de material plàstic per el model 240Z, del seu filial Datsun [10][12][13].



Figura 12: Aleró d'un cotxe [21].

### **Difusor**

El difusor és un element aerodinàmic que va col·locat a la part inferior del darrera del cotxe, té forma inclinada o corbada.

En els difusors s'aprofita l'aire que arriba de la part de sota del cotxe. Aquest aire arriba a una velocitat elevada degut a que passa per una secció petita (separació del fons del cotxe amb el terra) fins que es troba una secció més gran que proporciona el difusor amb la qual disminueix molt la seva velocitat i augmenta la seva pressió (Bernoulli). Aquesta diferència de pressions crea una succió que empeny el cotxe contra el terra i augmenta la tracció de les rodes i el rendiment aerodinàmic del cotxe [11] [12] [13].



Figura 13: Difusor d'un cotxe [21].

Una altra funció que té el difusor és extreure tot l'aire que passa per sota del cotxe a l'exterior. Si l'aire sortís directament a l'exterior, el canvi brusc de pressions crearia turbulències, que generarien força resistència a l'avanç, cosa que no interessa si es vol millorar el rendiment del cotxe.

Tal i com es pot veure a la Figura 14, l'angle de sortida de la part inferior del darrera del cotxe influeix en el coeficient de resistència i en el de sustentació (negativa). Amb un angle de  $25^\circ$  és quan hi ha més coeficient de força vertical negativa i per tant més força vertical cap avall en relació a la força de resistència aerodinàmica [1].

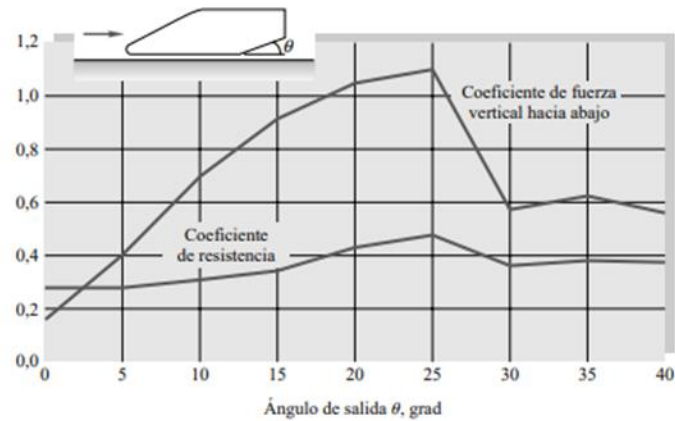


Figura 14: Efecte de l'angle de sortida dels baixos del cotxe [1].

### **3.Simulació del cotxe de sèrie amb CFD**

#### **3.1.Model del cotxe escollit**

L'automòbil escollit en aquest treball per realitzar les millores aerodinàmiques i l'estudi aerodinàmic és un Audi TT de l'any 2008. Per poder fer això he trobat un model que es pràcticament igual al real en una web on la gent penja els seus dissenys en 3D anomenada Grabcad.

Les modificacions es realitzaran amb el programa Solidworks 2018 Student Edition i l'objectiu és afegir-li al cotxe un aleró i un difusor per tal d'augmentar la sustentació negativa i fer l'estudi de les millores.

Característiques cotxe	
Número de portes	2
Longitud	4178 mm
Amplada	1842 mm
Alçada	1352 mm
Batalla (distància eixos rodes)	2468 mm
Coeficient aerodinàmic CD	0,3
Superfície frontal	2,09 m <sup>2</sup>
Massa	1315 kg

Taula 1: Característiques de l'Audi TT 2008 escollit [14].

El model fet amb Solidworks fa 4175 mm de llarg, 1845 mm d'ample, 1351 mm d'alt i la distància entre eixos 2468 mm.



Figura 15: Vista frontal del cotxe; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

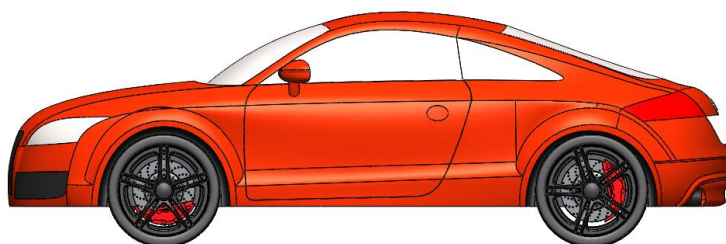


Figura 16: Vista lateral del cotxe; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

### **3.2.Introducció CFD**

La Dinàmica de Fluids Computacional (CFD) és la branca de la mecànica de fluids que utilitza anàlisis numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes sobre el flux de fluids, en aquest treball l'aire [15].

El funcionament està basat en el mètode de volums finits, que consisteix en discretitzar una regió de l'espai creant una malla, dividint una regió de l'espai en petits volums de control.

Un cop comença la simulació es resolen les equacions de conservació discretitzades en cada volum de control, es resol una matriu algebraica a cada cel·la de forma iterativa fins que el residu és suficientment petit. Segons el número d'iteracions que tingui la simulació es pot aconseguir més o menys precisió en els resultats però a canvi de necessitar mes temps per calcular.

La verificació de les dades obtingudes per CFD es sol realitzar en túnels de vent o altres models físics a escala.

### **3.3.Simulació del model de sèrie**

Per fer les simulacions s'utilitzarà el complement que ofereix Solidworks anomenat Solidworks Flow Simulation que està basat en CFD.

Per poder treballar amb el model he hagut de tancar varies superfícies obertes que podien interferir en la simulació, he arreglat els retrovisors que estaven flotant i he convertit el model en un sòlid de manera que la simulació es centri en la part externa del cotxe.

S'ha considerat el fons del cotxe pla, de manera que no hi hagi elements del cotxe que generin turbulències a l'aire que passa per sota del cotxe.

El procés de simulació amb Solidworks Flow Simulation està dividit en varies parts:

#### **-Geometria**

Al ser el mateix programa amb el que s'ha treballat la geometria es carrega directament del model que s'ha treballat.

Se li ha afegit un sòlid a la part inferior simulant el terra.

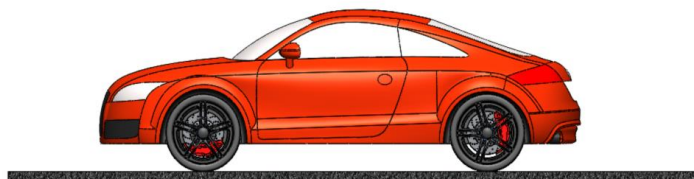


Figura 17: Geometria a simular, conjunt de cotxe i terra; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

## -Condicions contorn simulació

La simulació s'ha establert com un anàlisi del flux extern sense tenir en compte els forats interiors, com ja s'ha dit abans el model per dins és sòlid per evitar això, però s'ha marcat aquesta opció per assegurar-se de que el flux només és extern.

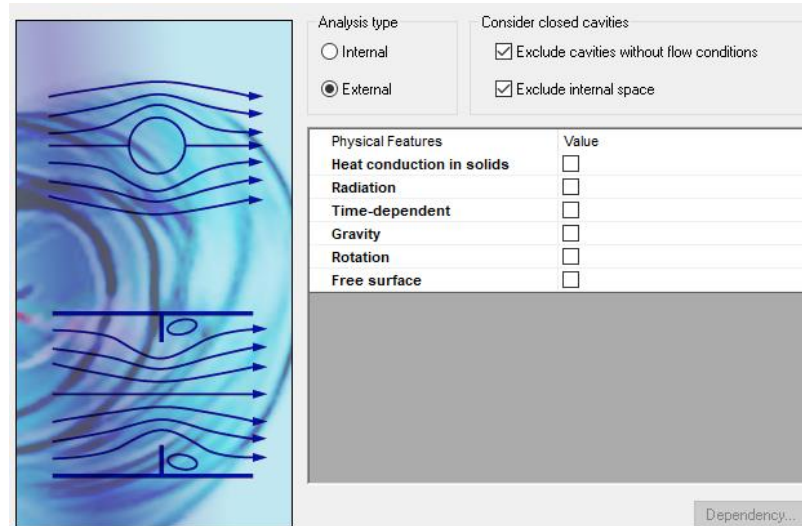


Figura 18: Configuració del tipus de simulació; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La pressió i temperatura de la simulació són les de l'ambient, 101325 Pa i 293,2 K.

La velocitat del l'aire a les simulacions és de 50 m/s (180 km/h) ja que és una velocitat elevada a la que l'efecte de l'aire és més important i amb la que s'extrauran millors resultats. L'efecte de la força de sustentació augmenta al quadrat respecte a la velocitat, si la velocitat es duplica, la força de sustentació es multiplicarà per 4. Aquesta velocitat es donaria només en circuit o en zones permeses ja que per les vies publiques no està permès circular tan ràpid.

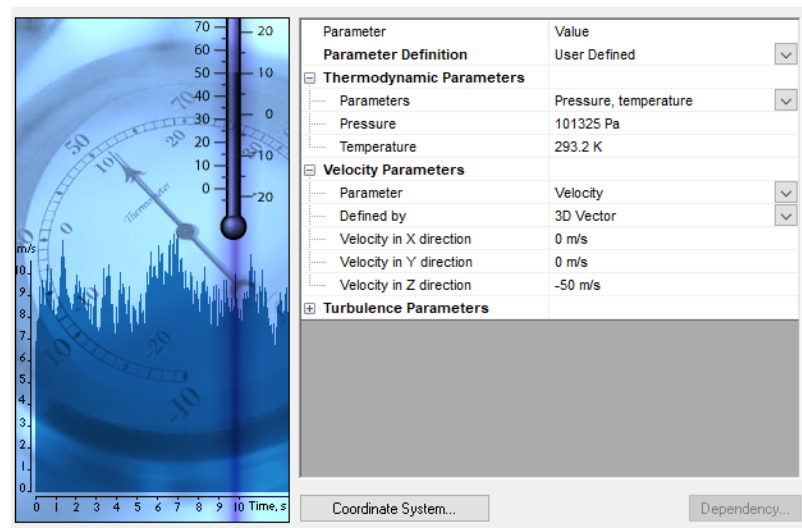


Figura 19: Paràmetres de la simulació; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

El terra s'ha considerat com una paret ideal, sense tenir en compte la rugositat i la temperatura.

### **-Volum de control i mallat**

El volum de control és l'espai en el qual tindrà lloc la simulació i al qual s'adaptarà la malla. És el suficientment gran com per que es pugui veure l'evolució del flux de l'aire davant del cotxe, al voltant i al darrera.

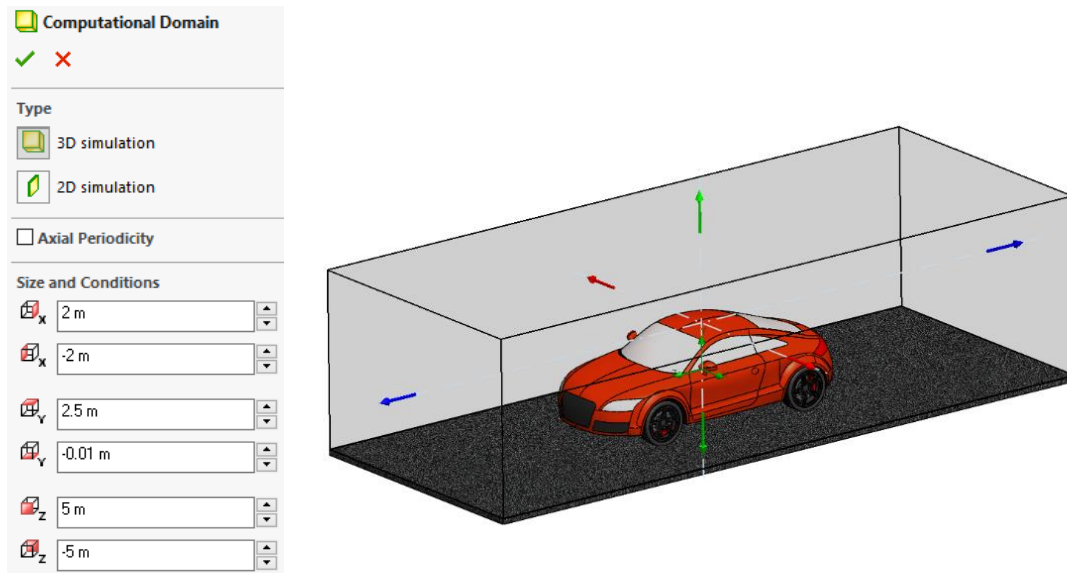


Figura 20: Volum de control i les seves dimensions; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La malla està el suficientment refinada per poder fer els càlculs i mostrar els resultats amb exactitud.

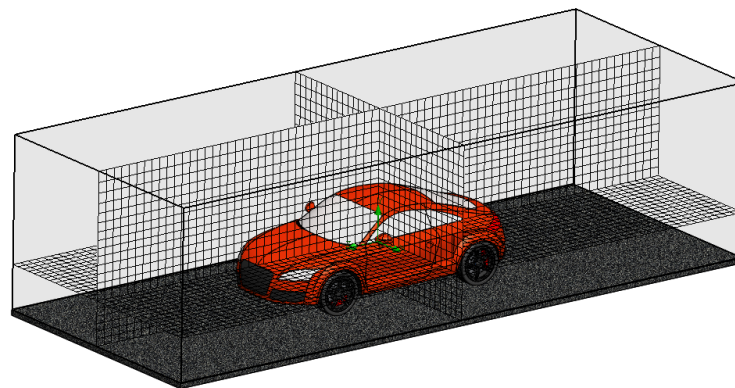


Figura 21: Mallat del model; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.



## -Resultats simulació

Un cop preparat tot, un programa extern a Solidworks és el que s'encarrega de fer tots els càlculs i de donar els resultats (post-procesats).

Els resultats serviràn per poder veure com es comporta el cotxe de sèrie i per quantificar l'efecte de les millores en el cotxe.

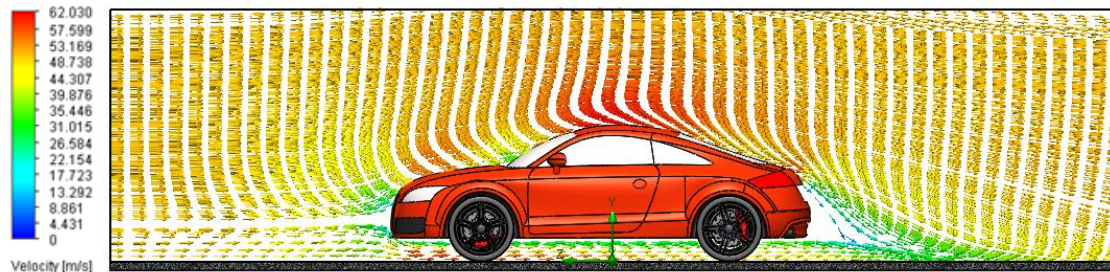


Figura 22: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe de sèrie a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

En aquesta figura es poden veure les línies de corrent de l'aire al voltant del cotxe; a les simulacions que es faran, aquestes línies estaran representades com fletxes. Es pot veure d'una manera clara com canvia la trajectòria de l'aire al trobar-se amb les diferents parts del cotxe.

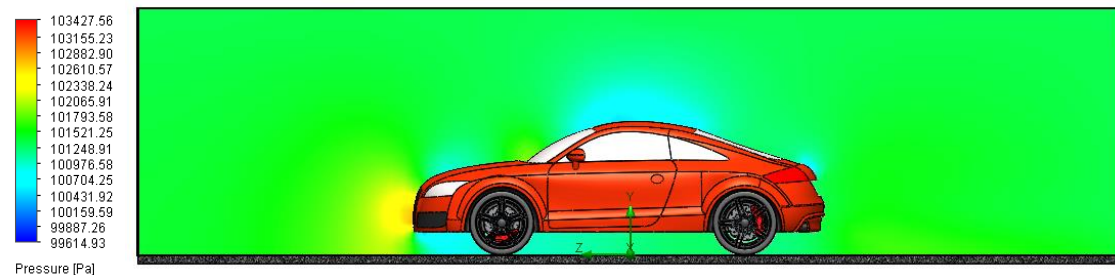


Figura 23: Pressió al voltant del cotxe de sèrie a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

En el cas del model de sèrie es pot veure com l'aire augmenta la seva pressió de manera considerable al trobar-se amb la zona frontal del vehicle i amb el vidre de davant en menor mesura. En canvi la redueix a la part entre el capó del cotxe i el vidre davanter, a la part del darrere i sobretot a la part del capó superior i al fons del cotxe.

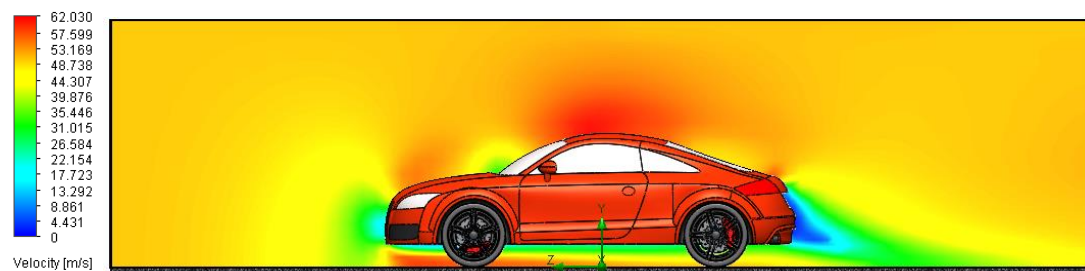


Figura 24: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe de sèrie a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.



Els resultats de la velocitat de l'aire són complementaris als de la pressió, l'aire augmenta la seva pressió en els punts on redueix la seva velocitat i viceversa.

En aquesta figura es pot veure com l'aire al trobar-se amb la part frontal del cotxe i amb el vidre frontal redueix la seva velocitat (llocs on ha augmentat la pressió).

A la part del sostre, al capó, al darrere i al fons pla ha augmentat la velocitat en gran mesura, això es deu a que l'aire té menys resistència (perfil alar) i a la part inferior a que hi ha una reducció important de la secció.

A la part del darrere del cotxe es pot veure l'estela que deixa el cotxe que tendeix cap a la part inferior, seguint la forma del cotxe.

	Valor	Valor promig	Valor mínim	Valor màxim
Força de sustentació (N)	866,403	861,452	851,381	876,119

Taula2: Força de sustentació generada al cotxe de sèrie; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La força de sustentació total generada al cotxe és de 866,403 N positiva, com ja s'ha vist el cotxe té forma de perfil alar i tendeix a sustentat. Cal dir que tot i que la força sigui positiva no cal preocupar-se per si el cotxe sortirà volant ja que el seu pes és de 13150 N en sentit negatiu que segueixen deixant el cotxe en terra ferma. Això sí quant menys força positiva hi hagi el cotxe tindrà un millor comportament i hi haurà un menor risc de que el cotxe es descontrola a una corba.

## 4. Milliores aerodinàmiques

### 4.1. Millora aleró

L'aleró està dissenyat amb la forma d'una ala d'avió inversa, la corba inferior té més longitud que la superior, per tal de donar sustentació negativa.

Té unes dimensions de 200 mm d'ample per 1000 mm de llarg i està mes o menys a uns 100 mm per sobre del maleter del cotxe.

L'aleró s'ha dissenyat amb Solidworks com una peça a part i llavors s'ha ajuntat amb el model de sèrie.



Figura 25: Model de la millora de l'aleró; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

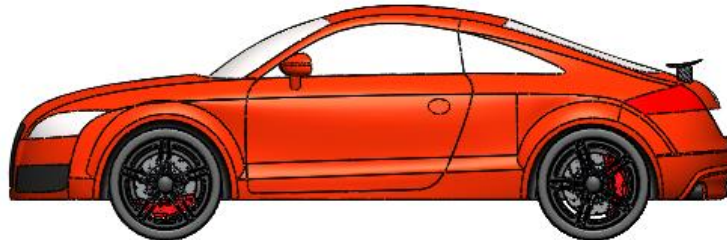


Figura 26: Vista lateral del cotxe amb aleró; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

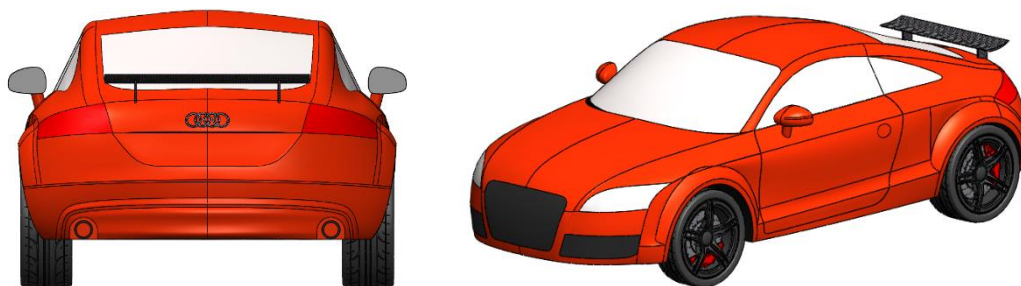


Figura 27: Vistes posterior i en perspectiva del cotxe amb aleró; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

## **4.2.Millora difusor**

El disseny del difusor s'ha fet ajustant-se a la forma del darrera del cotxe, sense interferir en els tubs d'escapament. L'angle de sortida és de  $25^\circ$  per maximitzar el seu efecte, tal com s'ha vist anteriorment a la relació entre l'angle de sortida a la part del darrera del cotxe i el coeficient de sustentació. En aquest cas s'ha treballat al mateix model de sèrie ja que s'ha tingut que retallar les superfícies del darrera per crear un espai on després s'ha creat el difusor com a un sòlid.

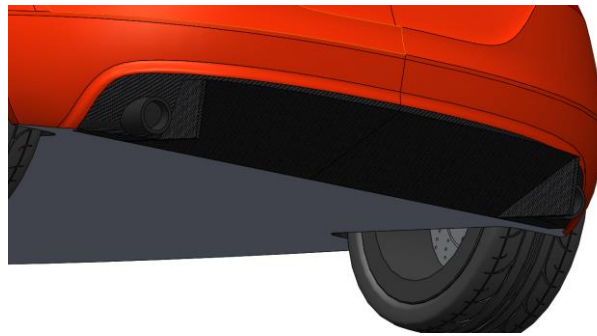


Figura 28: Vista en detall del difusor a la part posterior del cotxe; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

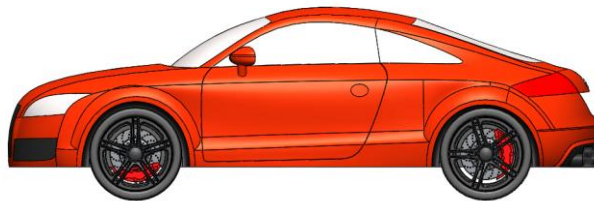


Figura 29: Vista lateral del cotxe amb difusor; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.



Figura 30: Vista posterior del cotxe amb difusor; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

### **4.3.Cotxe amb les dos millores**

Per tenir un model amb les dos millores el que s'ha fet és partir del model que tenia el difusor i se li ha ajuntat l'aleró al mateix lloc que el de la millora de l'aleró sol.

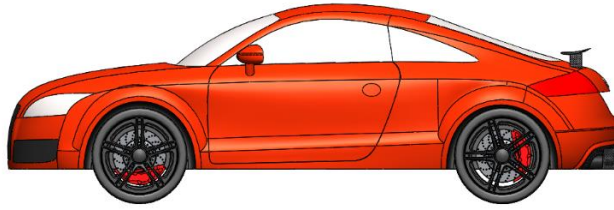


Figura 31: Vista lateral del cotxe amb difusor; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

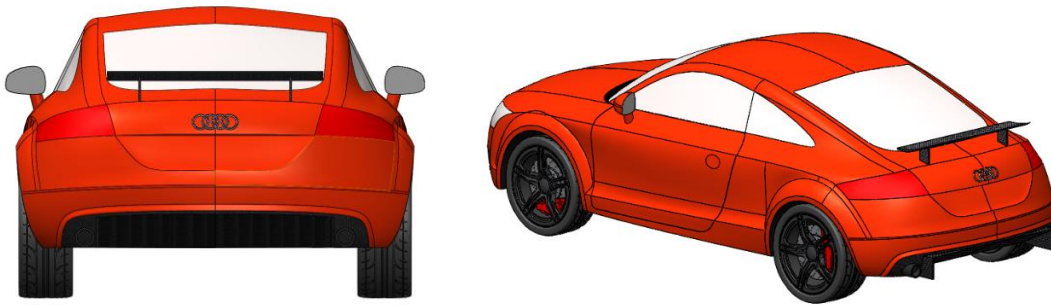


Figura 32: Vistes posterior i en perspectiva del cotxe amb les dos millores; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

## 5. Simulació del cotxe modificat amb CFD

### 5.1. Simulació del model amb aleró

Per fer les simulacions de la millora de l'aleró, al igual que a la resta, s'ha tingut especial cura a l'hora de tenir els mateixos paràmetres de simulació, així com l'escala dels resultats.



Figura 33: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe amb aleró a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

Observant la trajectòria del flux de l'aire es pot observar com l'aleró redirigeix l'aire que està darrera del cotxe de manera horitzontal.

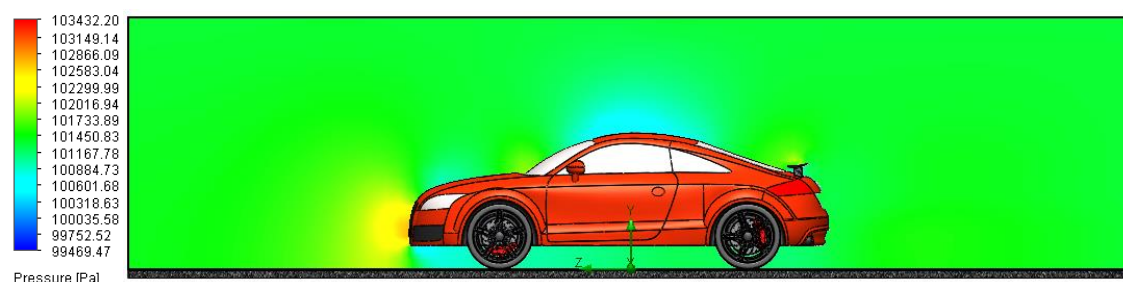


Figura 34: Pressió al voltant del cotxe amb aleró a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

En aquest gràfic es pot veure com augmenta la pressió a la part superior de l'aleró i com disminueix a la inferior gràcies a la forma de perfil alar invertit que té. Això fa que es generi una força cap avall.

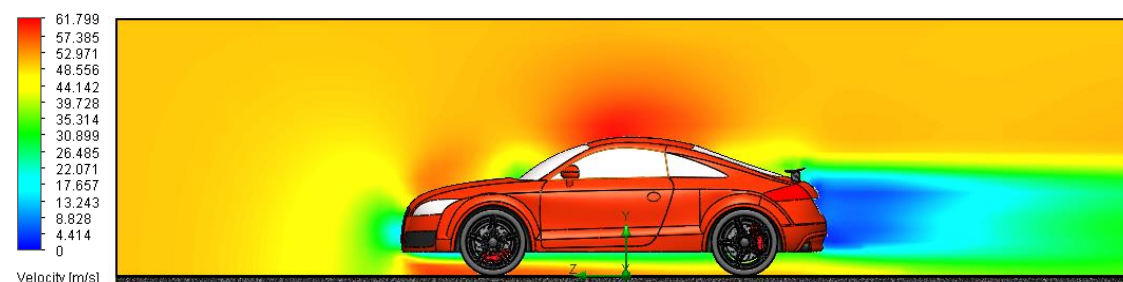


Figura 35: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe amb aleró a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.



La velocitat es redueix a la part superior de l'aleró i s'accelera a la part inferior, de manera contrària que la pressió, complint el teorema de Bernoulli.

	Valor	Valor promig	Valor mínim	Valor màxim
Força de sustentació (N)	305,839	309,252	305,230	318,093

Taula 3: Força de sustentació generada al cotxe amb aleró; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La força de sustentació total generada al cotxe amb aleró és de 305,839 N positiva, amb l'aleró s'aconsegueix una gran quantitat de força de sustentació negativa.

## 5.2.Simulació del model amb difusor

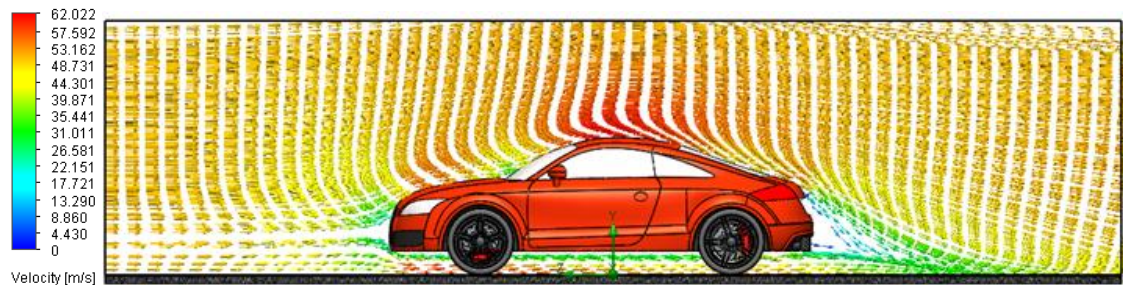


Figura 36: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe amb difusor a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

El difusor provoca un canvi de secció a la part del darrera del cotxe, el que fa que l'aire es vulgui escampar i pugui. El problema està en que arriba aire de la part superior del cotxe que impedeix que l'aire pugui pujar més.

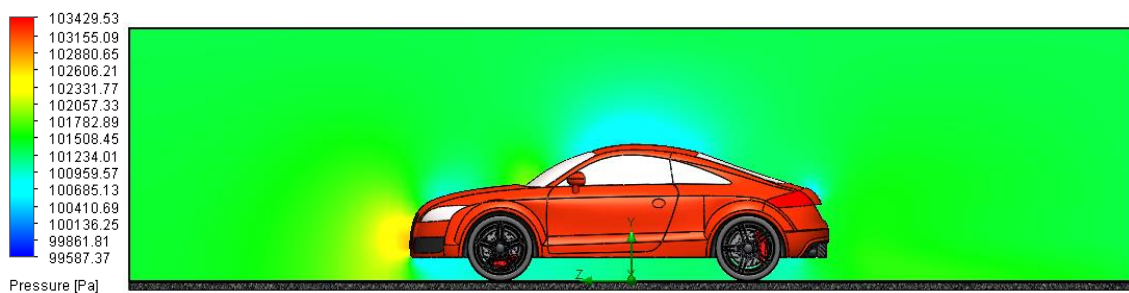


Figura 37: Pressió al voltant del cotxe amb difusor a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

El canvi de secció crea una diferència de pressions a la part del darrera (depressió) que succiona el cotxe cap avall.

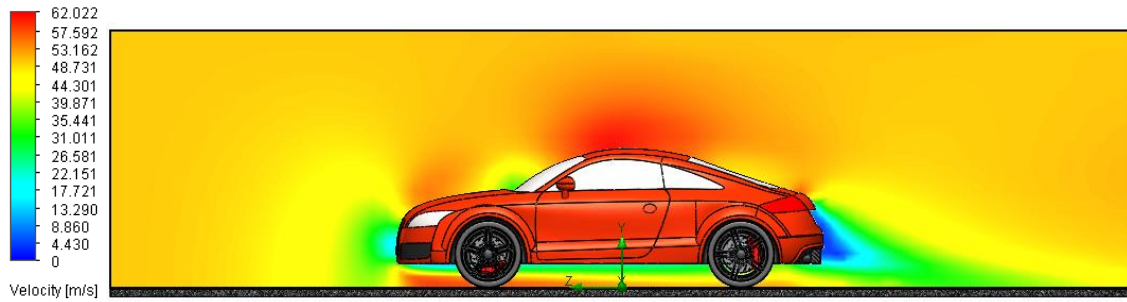


Figura 38: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe amb difusor a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

A la inversa de la pressió, es pot veure com a la part del darrera de la roda posterior augmenta la velocitat.

	Valor	Valor promig	Valor mínim	Valor màxim
Força de sustentació (N)	687,878	675,654	654,963	687,878

Taula 4: Força de sustentació generada al cotxe amb difusor; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La força de sustentació total generada al cotxe amb difusor és de 687,878 N positiva, amb el difusor s'aconsegueix força de sustentació negativa, però no tant com es voldria ja que l'aire de la part inferior no pot pujar al estar limitat per l'aire que ve de la part superior.

### 5.3. Simulació del model amb les dos millores

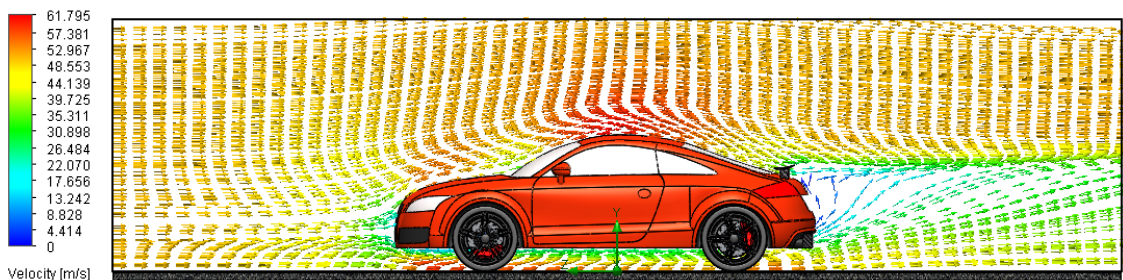


Figura 39: Trajectòria del flux de l'aire al voltant del cotxe amb les dos millores a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La inclusió de les dos millores provoca que l'aire que passa per la part superior del cotxe, segueixi de forma horitzontal, sense tendir cap al terra i permet que l'aire que passa per sota del cotxe pugui pujar gràcies al difusor.

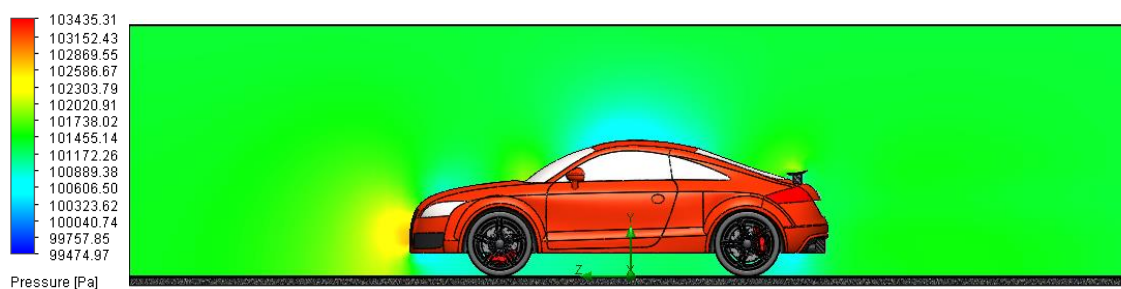


Figura 40: Pressió al voltant del cotxe amb les dos millores a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La pressió augmenta a l'aleró com ja s'ha vist, i disminueix a la part inferior del darrera, però en major magnitud ja que el difusor pot treballar millor al no trobar-se l'aire de la part superior.

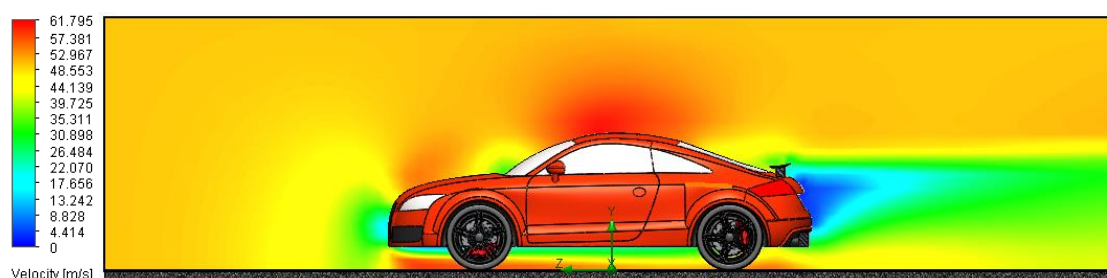


Figura 41: Velocitat del flux de l'aire al voltant del cotxe amb les dos millores a 50 m/s; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

També es nota com augmenta la velocitat a la part on a la Figura 40 ha disminuït la pressió i, veient l'estela de l'aire, com el difusor redirigeix l'aire i crea una estela horitzontal.

	Valor	Valor promig	Valor mínim	Valor màxim
Força de sustentació (N)	45,335	47,663	45,335	57,381

Taula 5: Força de sustentació generada al cotxe amb les dos millores; fet amb Solidworks 2018 Student Edition.

La força de sustentació total generada al cotxe amb difusor és de 45,335 N positiva, amb els dos elements aerodinàmics s'aconsegueix gairebé anular la sustentació positiva que genera l'estructura de sèrie del cotxe.



## 6.Anàlisi de resultats

Un cop ja s'han fet totes les simulacions i es coneixen tots els resultats, comparant-los es podrà justificar si les millores aplicades han complert amb la seva funció.

Per començar, com ja s'ha vist, als punts on augmenta la velocitat disminueix la pressió i viceversa, aquests punts són el para-xocs del cotxe, el fons pla, el capó, el parabrises, el sostre i el maleter (als models amb millores l'aleró i el difusor també ho són).

L'estudi aerodinàmic s'entén millor al separar la part superior del cotxe de la inferior. A la part superior un augment de la pressió implica una empenta cap avall i una disminució d'aquesta, una succió cap amunt. A la part inferior en canvi és al revés, pressió alta empenta cap amunt i pressió baixa succió cap avall.

Al para-xocs s'origina força de resistència en direcció oposada al moviment del cotxe, al fons pla del cotxe força de sustentació negativa ja que seguint el principi de Bernoulli, al disminuir la secció, augmenta la velocitat i això implica la disminució de pressió, que succiona al cotxe contra el terra.

Al capó, sostre i maleter es genera sustentació positiva degut a que augmenta la velocitat.

Al parabrises, disminueix la velocitat i es genera sustentació negativa.

Quan al cotxe se li afegeix l'aleró, aconsegueix, gràcies a la seva forma de perfil alar invertit una força de sustentació que empenta el cotxe contra el terra.

Quan se li afegeix el difusor, aconsegueix una força de sustentació al canviar la secció per on passa l'aire, generant una força de sustentació negativa.

Aquestes dues forces generades per les millores, situades a la part posterior del cotxe, empenyen el cotxe cap al terra de manera que contraresten la força de sustentació que es genera a causa de la geometria del cotxe de. Això fa que les rodes traccionin millor i que el cotxe no tingui problemes d'adherència a les corbes.

Finalment, la millor manera de veure la magnitud de les millores, es fent una comparació numèrica de els valors de la força de sustentació en els diferents models de simulació.

<b>Model del vehicle</b>	<b>Força de sustentació (N)</b>
Cotxe de sèrie	866,403
Cotxe amb aleró	305,839
Cotxe amb difusor	687,878
Cotxe amb les dos millores	45,335

Taula 6: Comparativa del les forces de sustentació obtingudes als diferents models.

El cotxe amb aleró aconsegueix reduir un 64,7 % la força de sustentació positiva, el cotxe amb difusor un 20,6 % i el cotxe amb l'aleró i el difusor un 94,7 %.

El resultat del cotxe amb les dos millores és interessant ja que la millora que donen els dos elements treballant junts és millor que la suma de cada millora per separat.

El difusor per si sol està limitat per l'aire que li arriba de la part superior del cotxe i gràcies a l'aleró, que guia aquest aire, pot portar l'aire cap amunt i ser més efectiu.

Tot i que hagin quedat 45,335 N de força de sustentació positiva, s'ha de pensar que també està el pes del cotxe, que és molt superior a aquesta força i en direcció contrària. Però l'important és que s'ha eliminat un 94,7 % de la força de sustentació positiva generada per la forma del cotxe de sèrie i ha millorat el rendiment aerodinàmic del cotxe.

## **7. Planificació del projecte**

Amb el projecte acabat, s'ha de mostrar un estudi temporal del temps dedicat a cada una de les parts del projecte, és a dir la planificació del projecte.

Les principals tasques del projecte han sigut:

- Recerca d'informació.
- Arreglar el model i disseny de les millores amb Solidworks 2018 Student Edition.
- Simulacions dels diferents models amb Solidworks 2018 Student Edition.
- Redactar la memòria del projecte.
- Revisar el treball i fer-li les modificacions pertinents.

Les hores dedicades a cada tasca són les següents:

<b>Activitat</b>	<b>Temps</b>
Recerca d'informació	40 h
Arreglar model i disseny millores	80 h
Simulacions	70 h
Redactar memòria	50 h
Revisió i modificacions finals	10 h
<b>Total</b>	<b>250 h</b>

Taula 7: Hores de dedicació a les tasques del projecte.

L'estimació de les hores s'ha fet a partir de la mitjana d'hores dedicades cada dia, que ha sigut de 2 hores.

El que més temps ha comportat han sigut arreglar el model del cotxe, fer les millores i fer les simulacions ja que han aparegut diferents problemes i ha portat bastant temps poder solucionar-los.

## **8.Conclusions**

En aquest projecte s'ha aconseguit l'objectiu principal, que era contrarestar la força de sustentació positiva generada per la forma del cotxe per tal de que aquest tingues una millor tracció i en general, un millor rendiment aerodinàmic.

Amb les simulacions s'ha pogut comprovar com al incloure els elements aerodinàmics el flux de l'aire al voltant del cotxe es veu afectat en gran mesura i el cotxe millora. Al mateix temps s'ha pogut anar veient com l'aire al trobar-se amb els diferents perfils i formes del cotxe complia el principi de Bernoulli.

Gràcies a aquest treball he pogut entendre millor l'aerodinàmica del cotxes i veure com són les simulacions amb CFD, una eina molt útil a l'hora de provar coses sense haver de fer models físics o fer la prova real.

Com a millora o continuació del treball estaria bé afegir elements aerodinàmics a la part davantera del cotxe per contrarestar també la sustentació positiva generada a la part davantera d'aquest.

També estaria bé fer un estudi de la resistència aerodinàmica del cotxe per veure com varia al incloure les millores aerodinàmiques i poder optimitzar el disseny d'aquestes encara més.

## **9.Bibliografia**

- [1] WHITE, F. M. Mecánica de Fluidos (Quinta Edición), Madrid: McGRAW-HILL, 2004.
- [2] Wikipedia. Consulta sobre l'aerodinàmica. Disponible a:  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Aerodin%C3%A1mica>
- [3] Wikipedia. Consulta sobre el teorema de Bernoulli. Disponible a:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli)
- [4] Consulta sobre el teorema de Bernoulli. Disponible a: [http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/23\\_teorema\\_de\\_bernoulli.html](http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4918/html/23_teorema_de_bernoulli.html)
- [5] Wikipedia. Consulta sobre el número de Reynolds. Disponible a:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero\\_de\\_Reynolds](https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Reynolds)
- [6] Wikipedia. Consulta sobre la capa límit. Disponible a:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Capa\\_l%C3%ADmite](https://es.wikipedia.org/wiki/Capa_l%C3%ADmite)
- [7] Consulta sobre la capa límit. Disponible a:  
<http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/03/capa-lmite.html>
- [8] Wikipedia. Consulta sobre la resistència aerodinàmica. Disponible a:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia\\_aerodin%C3%A1mica](https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_aerodin%C3%A1mica)
- [9] Wikipedia. Consulta sobre la sustentació. Disponible a:  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Sustentaci%C3%B3n>
- [10] Wikipedia. Consulta sobre l'aleró. Disponible a:  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Aler%C3%B3n>
- [11] Wikipedia. Consulta sobre el difusor. Disponible a:  
<https://es.wikipedia.org/wiki/Difusores>
- [12] Consulta sobre l'aerodinàmica dels cotxes. Disponible a:  
<https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/07/24/analisis-carga-aerodinamica-downforce/>
- [13] Consulta sobre l'aerodinàmica dels cotxes. Disponible a:  
<http://www.fuelwasters.com/2011/07/entiendes-la-aerodinamica-de-un-coche.html>
- [14] KM77. Fitxa tècnica del cotxe. Disponible a:  
<https://www.km77.com/coches/audi/tt/2006/coupe/estandar/tt-coupe-18-tfsi/datos>
- [15] Consulta sobre la dinàmica de fluids computacional. Disponible a:  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica\\_de\\_fluidos\\_computacional](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos_computacional)
- [16] Fotos del flux laminar i turbulent. Disponible a: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/convection-convective-heat-transfer/laminar-vs-turbulent-nusselt-number/>

**[17]** Foto de la capa límit. Disponible a:

<https://aerocomando.blogspot.com/2015/08/la-capa-limite.html>

**[18]** Foto de les components de la força aerodinàmica. Disponible a:

[https://www.taringa.net/+autodeportes/0497-el-origen-del-efecto-suelo\\_13g0dh](https://www.taringa.net/+autodeportes/0497-el-origen-del-efecto-suelo_13g0dh)

**[19]** Foto de l'esquema de la força de sustentació positiva. Disponible a:

[https://www.mpoweruk.com/flight\\_theory.htm](https://www.mpoweruk.com/flight_theory.htm)

**[20]** Foto de l'esquema de la força de sustentació negativa. Disponible a:

<http://www.diracdelta.co.uk/science/source/d/o/downforce/source.html#.XPkOr4gzaUk>

**[21]** Imatges extretes de Google

La resta d'imatges estan extretes de Solidworks 2018 Student Edition.